

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Měření vlivu buzení výkonových LED na jejich spektrální vlastnosti**  
**Measuring of the alarm influence for power LEDs on their spectral**  
**properties**

**2010**

**Tomáš Koudelka**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Tomáš Koudelka**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Měření vlivu buzení výkonových LED na jejich spektrální vlastnosti

Measuring of the alarm influence for power LEDs on their spectral properties

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti a konstrukce výkonových LED.
2. Realizujte driver výkonových LED jako řízený proudový zdroj.
3. Sestavte měřicí systém pro měření spektrálních vlastností výkonových LED v závislosti na proudech diodou.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
*vedoucí katedry*



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

## **Abstrakt**

V práci je nejprve objasněna problematika polovodičů. Co jsou to polovodiče, jak se chovají a jak za použití polovodičů vzniká světlo. Dále jsou popsány všeobecné informace ohledně LED. Jak se vyrábějí, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody používání. Následuje více zaměřené téma na detaily ohledně výkonových LED. V čem se liší od obyčejných LED, jejich konstrukce a vlastnosti. Další kapitola se zabývá LED drivers a postup při konfiguraci konkrétního driveru na zadané hodnoty při napájení ze sítě střídavého napětí. Poslední kapitola se zabývá měřením spektrálních charakteristik různých typů LED. Zkoumá se vliv procházejícího proudu na tuto spektrální charakteristiku a tyto výsledky se hodnotí.

## **Klíčová slova**

Polovodič, LED, výkonová LED, řídicí proud, vlnová délka, driver, spektrální charakteristika

## **Abstract**

Firstly, there is explained the theme of semiconductors. What the semiconductor is, what is its behaviour and semiconductor's light origination. Next theme is general information about LEDs. LED manufacture, features, advantages and disadvantages of using. Deeper examine of power LEDs is next in order. Difference between power LEDs and regular LEDs, its structure and features. Next chapter is dedicated to LED drivers and to construction of concrete subject. Last chapter deals with measuring spectral characteristics of various types of LEDs and its dependence on flowing current.

## **Key words**

Semiconductor, LED, power LED, operating current, wavelength, driver, spectral characteristic

## Seznam zkratek

AlAs arsenid hliníku

AlP fosfid hliníku

AlSb antimonid hliníku

CRI Color Rendering Index

GaAs arsenid gália

GaP fosfid gália

GaSb antimonid gália

Ge germánium

InAs arsenid india

InGaN nitrid gália a india

InP fosfid india

InSb antimonid india

$I_F$  výstupní proud driveru protékající diodou [A]

$I_{F(MAX)}$  horní hodnota výstupního proudu driveru protékajícího diodou podle zadání [A]

$I_{F(MIN)}$  dolní hodnota výstupního proudu driveru protékajícího diodou podle zadání [A]

$I_f$  proud diody v propustném směru [A]

$I_{fmax}$  maximální proud diody v propustném směru [A]

$I_r$  proud diody v závěrném směru [A]

$I_s$  výstupní proud transformátoru [A]

Si křemík

SiC karbid křemíku

$U_{1ef}$  efektivní hodnota napětí na primárním vinutí transformátoru [V]

$U_{2ef}$  efektivní hodnota napětí na sekundárním vinutí transformátoru [V]

$U_{br}$  brumové napětí usměrňovače [V]

$U_{dmax}$  maximální usměrněné výstupní napětí [V]

$U_f$  otevírací napětí diody v můstku [V]

$U_r$  závěrné napětí diody v můstku [V]

$V_{IN}$  vstupní napětí driveru [V]

$V_{OUT}$  výstupní napětí driveru [V]

$\Delta\lambda$  šířka spektrální charakteristiky [nm]

$\Delta V_{IN(MAX)}$  maximální rozkmit napětí na vstupu driveru [V]

$\lambda_p$  vlnová pracovní délka [nm]

## Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Polovodiče .....</b>	<b>9</b>
2.1 Energetické pásy v polovodičích .....	9
2.2 Vlastní vodivost polovodiče .....	10
2.3 Nevlastní vodivost polovodiče .....	11
2.4 Přechod PN.....	11
2.5 Přechod PN s přiloženým vnějším napětím v propustném směru.....	13
2.6 Vznik záření v polovodičích .....	14
<b>3. LED .....</b>	<b>15</b>
3.1 Historie .....	15
3.2 Konstrukce.....	15
3.3 Efektivita a funkční parametry.....	16
3.4 Výhody .....	16
3.5 Nevýhody .....	17
3.6 Použití.....	18
3.7 Výkonové LED.....	18
3.7.1 Konstrukce.....	19
3.7.2 Bílé LED.....	19
3.7.3 Světelná účinnost .....	19
3.7.4 Teplota chromatičnosti .....	20
3.7.5 Účinnost .....	20
3.7.6 Teplotní závislost.....	20
3.7.7 Vyzařovací úhel .....	21
3.7.8 Životnost.....	21
3.7.9 Věrnost barev .....	21
3.7.10 Napájení .....	21
<b>4. Laser .....</b>	<b>22</b>
4.1 Laser LED .....	22
4.2 Rezonátory .....	22

<b>5. Driver .....</b>	<b>23</b>
5.1 Když vstupní napětí převyšuje napětí LED .....	23
5.2 Když je vstupní napětí menší než napětí LED .....	24
5.3 Konstrukce LED driveru .....	24
5.3.1 Vstupní napětí driveru .....	25
5.3.2 Nastavení driveru .....	26
<b>6. Realizace pracoviště pro praktické měření .....</b>	<b>30</b>
6.1 Spektrometr USB650.....	30
6.2 SpectraSuite .....	31
6.3 Přehled vzorkovacího systému spektrometru .....	31
6.4 Princip vzorkování spektrometru .....	32
6.5 Princip činnosti spektrometru .....	32
6.6 Postup měření .....	33
<b>7. Závěr .....</b>	<b>34</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>36</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>38</b>



## 1. Úvod

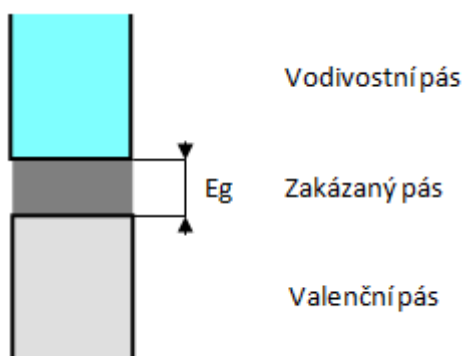
Hlavním úkolem této práce bylo zjistit vliv protékajícího proudu na spektrální vlastnosti LED. Přesněji na její posun po spektrální ose a na změnu šířky spektrální charakteristiky při zvyšujícím se proudu při zanedbání teploty jako dalšího parametru ovlivňujícího tento jev. Jako první jsou probrány polovodiče, jakožto materiál, ze kterého jsou LED vyrobeny. Hlavní vlastnosti polovodičů, díky kterým jsou LED schopny vyzařovat světlo. Dále jsou popsány všeobecné informace ohledně LED. V podkapitole LED je popsán rozdíl mezi obyčejnými LED a výkonovými a jsou zde uvedeny hlavní rysy výkonových LED. Protože jsem měřil i spektrální vlastnosti laserové LED, tak malá kapitola nastíní vlastnosti těchto součástek. Další větší kapitola se zabývá LED drivery a postup při konfiguraci konkrétního driveru na zadané hodnoty při napájení ze sítě střídavého napětí. Nakonec jsou uvedeny informace o měření spektrálních charakteristik a jsou učiněny závěry.

## 2. Polovodiče

Polovodič je krystalická nebo amorfní pevná látka, jejíž elektrická vodivost se nachází mezi vodivostí kovů a dielektrika a lze ji podstatně ovlivnit změnou teploty, obsahem příměsí či dopadajícím světlem.

### 2.1 Energetické pásy v polovodičích

Schopnost látky vést elektrický proud závisí na šířce zakázaného pásu. Čím je tento zakázaný pás širší, tím je látka horším vodičem elektrického proudu, neboť je potřeba dodat elektronům větší energii, aby přešli z valenčního do vodivostního pásu (obrázek 1). Energie potřebná k překonání zakázaného pásu je u polovodičů  $E_g \sim 1 \text{ eV}$ .



Obr. 1: Znárodnění energetických pásů polovodičů

Hodnoty zakázaných pásů některých polovodičů jsou uvedeny v tabulce 1.

Materiál	Energie zakázaného pásu $E_g$ [eV]
Ge	0,66
Si	1,11
AlP	2,45
AlAs	2,16
AlSb	1,58
GaP	2,26
GaAs	1,42
GaSb	0,73
InP	1,35
InAs	0,36
InSb	0,17

Tabulka 1: Přehled hodnot energií zakázaných pásů pro různé polovodičové materiály

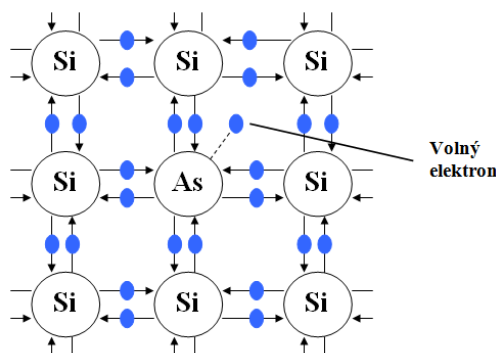
Je-li  $E_g > 3$  eV pak se již jedná o izolanty. Nepůsobí-li na látku elektrické pole, ale je zajištěn přívod jiné energie (tepelné), aby se elektrony mohly uvolňovat, pohybují se v mřížce neuspořádaně. Látka je v dynamické rovnováze. Připojí-li se napětí, vznikne elektrické pole uvnitř krystalické mřížky a volné elektrony se uvedou do pohybu.

## 2.2 Vlastní vodivost polovodiče

Základními polovodivými materiály jsou prvky 4. skupiny periodické soustavy prvků. Ve společné sféře jsou 4 elektrony, které jsou pevně vázány kovalentní vazbou. Působením záření se elektron uvolní, vznikne tzv. díra a ta působí na okolní elektron, jakoby v ní byl kladně nabitý náboj. Tohle se děje na různých místech látky současně. Střední doba života elektronů i děr je stejná. Při rozbití vazby vznikne pár elektron díra a při rekombinaci celý pár zanikne. Při zvyšování teploty vlastní vodivost polovodiče roste.

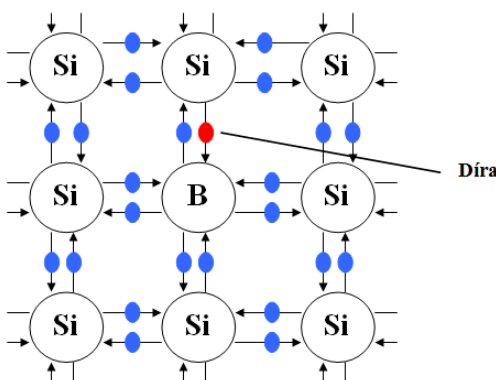
## 2.3 Nevlastní vodivost polovodiče

Je způsobena příměsí pětímocného prvku do základní struktury čtyřmocného materiálu. U této vazby se využije pouze čtyř z pěti valenčních elektronů příměsi. Pátý elektron se vazby neúčastní a je poután v jádru poměrně volně. Uvolněné elektrony pětímocných příměsí (tzv. donorů) vytvářejí vodivost zprostředkovanou pohybem záporných nábojů. Tato vodivost se nazývá nevlastní vodivost typu N (obrázek 2).



Obr. 2: Krystalová mříž křemíku s přidaným atomem arsenidu

Pokud je příměsí třímocný prvek (akceptor), potom jeden elektron chybí k tomu, aby se vytvořila nasycená kovalentní vazba. Takové volné místo se nazývá díra a působí na ostatní elektrony jako pohyblivý kladný náboj. Vodivost vytvořená tímto způsobem se nazývá nevlastní vodivost typu P (obrázek 3).

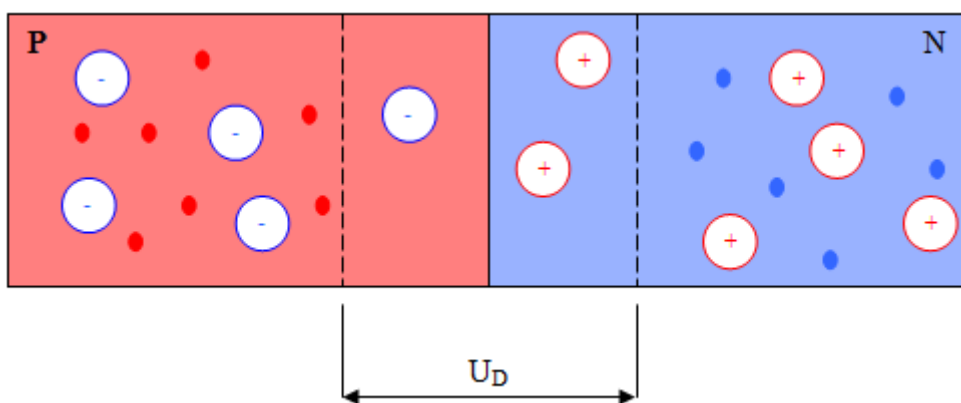


Obr. 3: Krystalová mříž křemíku s přidaným atomem bóru

## 2.4 Přejchod PN

Je to místo, kde se mění vodivost typu P na N. V části P jsou kromě neutrálních atomů také záporné ionty a stejný počet volně pohyblivých děr. V části N jsou neutrální atomy, kladné

ionty a stejný počet volně pohyblivých elektronů. Po spojení obou částí vhodným technologickým postupem tak, aby krystalová mřížka bez jakýchkoli nepravidelností plynule navazovala na krystalovou mřížku druhé části, nastává difúze. To je snaha volných nosičů náboje rovnoměrně se rozptýlit po celém objemu. Jakmile některý elektron přejde z části N do P nebo díra z části P do N poruší se rovnováha elektrických nábojů původně elektricky neutrálních částí. Části N, která ztrácí elektrony, začne převládat kladný náboj pevně vázaných iontů donorů. Zároveň v části P, kde elektrony rekombinují, začíná převládat záporný náboj pevně vázaných iontů akceptorů. Mezi částí P a N se vytváří rozdíl potenciálů, tzv. difúzní napětí  $U_D$ . Současně se vznikem  $U_D$  se vytváří elektrostatické pole pevných iontů, které působí proti difúzi. Záporné ionty v části P odpuzují elektrony a v části N kladné ionty odpuzují přicházející díry. Každý další přechod náboje zvětšuje intenzitu pole a tím zesiluje odpudivou sílu na difundující nosiče náboje. Děj probíhá tak dlouho, až dojde k dynamické rovnováze mezi kinetickou energií difundujících nosičů náboje a odpudivou silou elektrostatického pole iontů (obrázek 4).

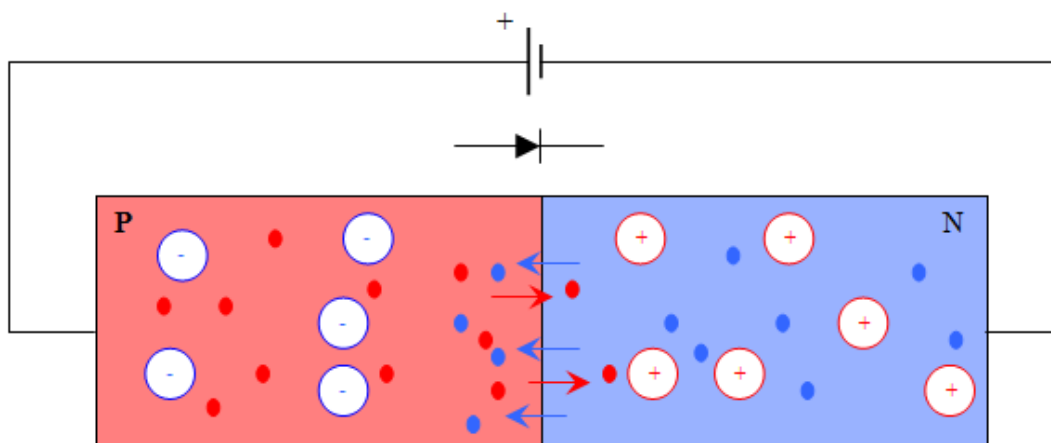


Obr. 4: Přechod mezi P a N

$U_D$  pro přechod PN GaAs = 1,3 V. Ge = 0,2 V, Si = 0,56 V. Pro majoritní (většinové) nosiče náboje tvoří difúzní napětí překážku zvanou potenciálová přehrada, přes kterou tyto nosiče nemohou pronikat. V okolí přechodu vzniká oblast, kde nejsou žádné majoritní nosiče náboje. Pokud není na přechod přiloženo vnější napětí má tato oblast tloušťku asi 1  $\mu\text{m}$ . Díry z části N jsou přitahovány zápornými ionty části P a pronikají přes přechod. Podobně elektrony z části P, které se nacházejí v blízkosti potenciálové bariéry.

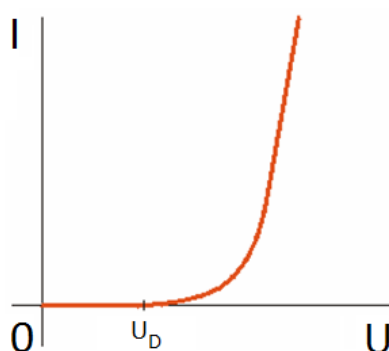
## 2.5 Přechod PN s přiloženým vnějším napětím v propustném směru

Vnější napětí je nesouhlasné s polaritou difúzního napětí a jeho elektrostatické pole působí proti elektrostatickému poli pevných iontů. Majoritní nosiče se vlivem tohoto pole přiblíží k přechodu, potenciálová přehrada se zruší a vyprázdněná oblast zanikne. Přechod je pro majoritní nosiče otevřen (obrázek 5).



Obr. 5: Přechod PN s přiloženým vnějším napětím

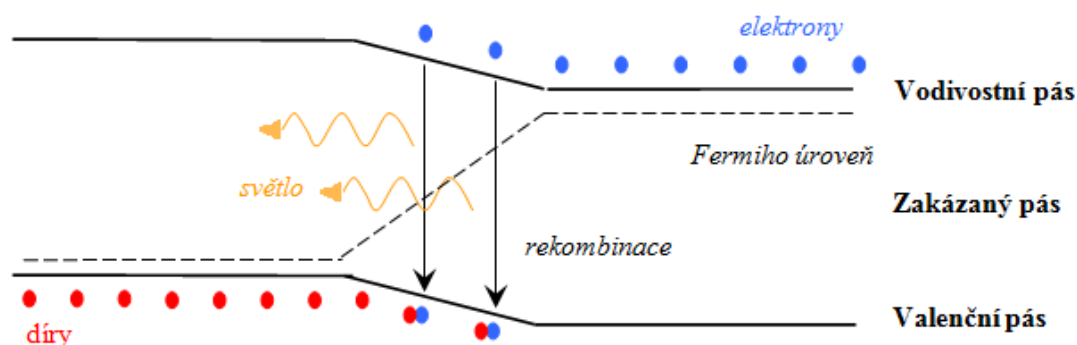
Obvod je polarizován v přímém směru a obvodem prochází proud  $I_F$ , který při zvětšování vnějšího napětí prudce narůstá, protože v krystalové mřížce je velké množství majoritních nosičů připravených k vedení proudu. Tuto závislost proudu na napětí ukazuje VA charakteristika diody na obrázku 6. V propustném směru je odpor přechodu velmi malý, při opačné polarizaci má přechod odpor velmi vysoký.



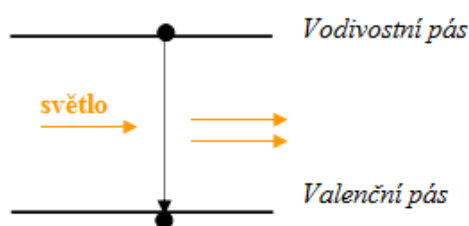
Obr. 6: VA charakteristika diody

## 2.6 Vznik záření v polovodičích

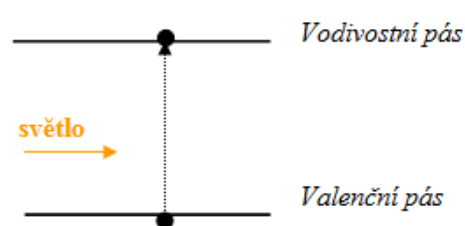
Emise fotonů vzniká na přechodu PN, kde dochází k přechodu elektronů z vyšších energetických hladin do nižších a rozdíl energie je vyrovnán uvolněním energie do prostoru ve formě fononu (teplo) nebo fotonu (světlo). Toto je tzv. spontánní emise (obrázek 7), ke které dochází nahodile. Druhý způsob je pomocí tzv. stimulovaná emise (obrázek 8). Neboli pokud je v atomu excitován elektron do vyšší hladiny, může průlet fotonu obalem atomu způsobit jeho přechod do nižší hladiny s tím, že vznikne nový foton s energií rovnou dopadajícímu fotonu. Dopadající foton nezaniká. Nově vygenerovaný foton má stejnou frekvenci, směr, polarizaci a fázi. Čím více atomů je excitováno na vyšší hladinu, tím je větší pravděpodobnost vzniku stimulované emise nad spontánní – populační inverze. Může však i dojít k absorpci záření s excitací elektronu (obrázek 9). Při průletu fotonu atomovým obalem dojde k jeho absorpci a následnému přechodu daného elektronu na jinou kvantovou úroveň s vyšší energií.



Obr. 7: Přechod elektronů do nižší energetické hladiny s následující spontánní emisí světla



Obr. 8: Stimulovaná emise světla



Obr. 9: Absorpce světla s následkem přechodu elektronu do vyššího energetického stavu

### 3. LED

Luminescenční dioda LED (Light Emitting Diod) využívá principu, kdy je PN přechod zapojen v propustném směru a vlivem elektron děrové rekombinace dochází k vyzařování světla.

Jestliže napětí v propustném směru vzroste nad určitou hodnotu, počet elektronů a děr v oblasti přechodu se může zvýšit natolik, že dosáhne populační inverze a stimulovaná emise převáží nad absorpcí. To má za následek vyzařování nekoherentního světla s úzkým spektrem.

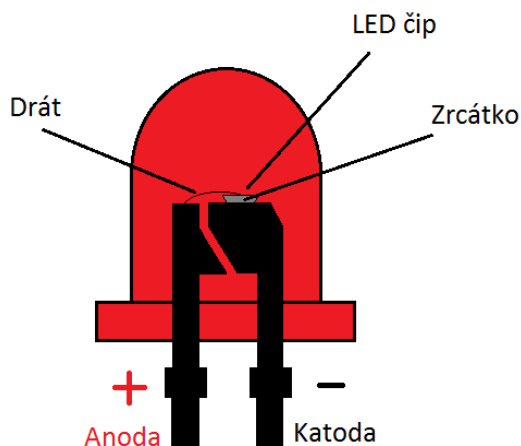
#### 3.1 Historie

LED byly vynalezeny ruským vědcem a vynálezcem Oleg Vladimirovich Losevem v roce 1927. Praktické využití však nenašly ještě po mnoho desetiletí. V roce 1961 experimentátoři Robert Biard a Gary Pittman pracující v Texas Instruments zjistili, že polovodič GaAs při protékajícím proudu emituje infračervené záření, načež si tento vynález nechali patentovat. První LED schopnou vyzařovat viditelné světlo (červené) vynalezl Američan Nick Holonyak Jr. v roce 1962. O deset let později vynalezl bývalý Holonyakův student M. George Craford první žlutou LED a vylepšil jas červené LED desetinásobně. V roce 1976 vytvořil T.P. Pearsall první vysokosvitivou, výkonovou LED současně s objevením nových polovodičových materiálů. Do roku 1968 byly LED vyzařující infračervené i viditelné světlo vysoce nákladné, a tak neměly mnoho praktického využití. Monsanto Company byla první organizace, která začala masově vyrábět LED vyzařující viditelné světlo, kterých bylo použito jako červených indikátorů. Hewlett packard začala tyto LED z GaAsP využívat v alfanumerických displejích svých kalkulaček. Roku 1970 Fairchild Optoelectronics začala komerčně vyrábět levné integrované čipy s inovovanými pouzdry. Tyto techniky se pro výrobu LED využívají dodnes.

#### 3.2 Konstrukce

Vlnová délka vyzářeného světla, a tudíž jeho barva, závisí na tloušťce zakázaného pásma diody a materiálu, ze kterého je dioda vyrobena. U křemíkových nebo germaniových diod elektrony a díry rekombinují bez vyzařování světla, protože tyto materiály mají nepřímý zakázaný pás. Materiály používané pro výrobu LED mají přímý zakázaný pás s energiemi odpovídajícími infračervenému, viditelnému nebo ultrafialovému světlu. Při výrobě se používá metody epitaxe, kdy polovodič roste z kapalně fáze a metody MOCVD, kde se jedná o nanášení chemických par na sebe. Polovodič se vyrábí v provedení rovinném, kulovém nebo s boční emisí. Čip s PN přechodem se umísťuje do parabolického zrcátka, které je upevněno k plechovému kontaktu, a je nakontaktován drátkem k druhému plechovému kontaktu. Kladný kontakt bývá většinou delší. Oba kontakty jsou zality do průhledného plastu ve tvaru pouzdra LED (obrázek 10).

Pouzdra se vyrábějí v různých průměrech a tvarech. Čip se zalévá do silikonového materiálu. Většina materiálů použitých pro výrobu LED mají vysoký index lomu. To má za následek, že hodně světla se na rozhraní materiál vzduch odrazí zpět na čip. Tohle je nežádoucí účinek a při výrobě je cílem jej co nejvíce eliminovat.



Obr. 10: LED

### 3.3 Efektivita a funkční parametry

Typické LED jsou konstruovány na jmenovitý výkon kolem 30 až 60mW. Řídící proudy jsou řádově v desítkách miliampér. Velkou výhodou LED osvětlení je vysoká efektivita, která se udává v poměru vyzařeného světla na jednotku výkonu. LED v sériové produkci dosahují hodnot okolo 30 lm/W. V laboratorních podmínkách dosáhly hodnot přes 100 lm/W. Pro srovnání běžné 60 W žárovky dosahují hodnot 15 lm/W a fluorescenční zářivky 100 lm/W. Problémem je, že efektivita výrazně klesá s nárůstem protékajícího proudu. Energie se totiž spotřebovává na teplo, místo na produkci světla.

### 3.4 Výhody

Efektivita – LED produkují více světla na jednotku wattu, než žárovky

Bezpečnost – napájení bezpečným napětím (SELV)

Barva – LED mohou vyzařovat kteroukoli barvu bez nutnosti použití filtrů

Rozměry – LED mohou být velmi malé (menší než 2 mm)

Čas potřebný k zapnutí/vypnutí – LED se rozsvítí velmi rychle. Typická červená indikátorová LED se plně rozsvítí za 1  $\mu$ s. LED použité v komunikačních zařízeních jsou ještě rychlejší



Periodizace – LED jsou ideální pro použití v aplikacích, které vyžadují rychlé zapínání a vypínání

Stmívání – LED mohou být jednoduše ztmaveny buď pomocí PWM nebo snižováním protékajícího proudu

Studené světlo – LED vyzařují, v porovnání s ostatními světelnými zdroji, velmi málo tepla ve formě infračerveného záření

Životnost – LED mají relativně dlouhou životnost. Až 100 000 hodin. Žárovky mají 10 000 – 15 000 hodin, žárovky 1 000 - 2 000 hodin

Odolnost vůči otřesům – LED nemají žádné pohyblivé části, tudíž jsou velmi odolné vůči vnějším otřesům na rozdíl od křehkých zářivek a žárovek

Úhel vyzařování - definovaný úhel vyzařování světelného svazku

Toxicita – LED neobsahují rtuť na rozdíl od zářivek

### **3.5 Nevýhody**

Vysoká pořizovací cena – LED jsou v základě nejdražšími světelnými zdroji, jestliže se bavíme o ceně za 1 lumen

Teplotní závislost – výkon diody závisí na provozních teplotách. Používání LED na hranici proudových specifikací může vést k přehřátí jejího pouzdra a k následnému zničení. V takových případech je nutné zajistit chlazení LED

Citlivost na napětí – LED musí být napájeny napětím vyšším, než je jejich otevírací napětí a proudem menším než je maximální dovolený

Kvalita světla – vnímání barev pod světlem LED se může výrazně lišit od vnímání barev pod slunečním světlem nebo od světla ze žárovky

Plošnost světelného záření – LED nemohou být použity v aplikacích, kde potřebujeme ostře směrový paprsek světla. Nejsou schopny směrovosti pod několik stupňů. Pro tyto účely jsou vhodné LED lasery

Modrý hazard – modré a bílé LED jsou schopny převýšit limity záření bezpečné pro lidský zrak.

Modré znečištění – bílé LED vyzařují poměrně více modrého světla, než ostatní venkovní osvětlení. Modrá barva má za následek světelné znečišťování

### 3.6 Použití

Venkovní osvětlení

Osvětlení interiérů

Indikátory stavu na všech typech zařízení

Dopravní světla a značení

Světla na motocyklech, kolech a automobilech

Světla na železničních přejezdech

V ručních svítilnách

Informační tabule

Osvětlení přístrojů – například v hodinkách

Dálková ovládání často využívají infračervených LED

V optických vláknech, nebo v bezdrátových optických systémech

V maticových uspořádáních jako zobrazovače informací

Jako podsvícení pro LCD televize a displeje

V hodinkách

apod.

### 3.7 Výkonové LED

Výkonovými LED (obrázek 11) protékají mnohonásobně větší proudy jak obyčejnými LED.

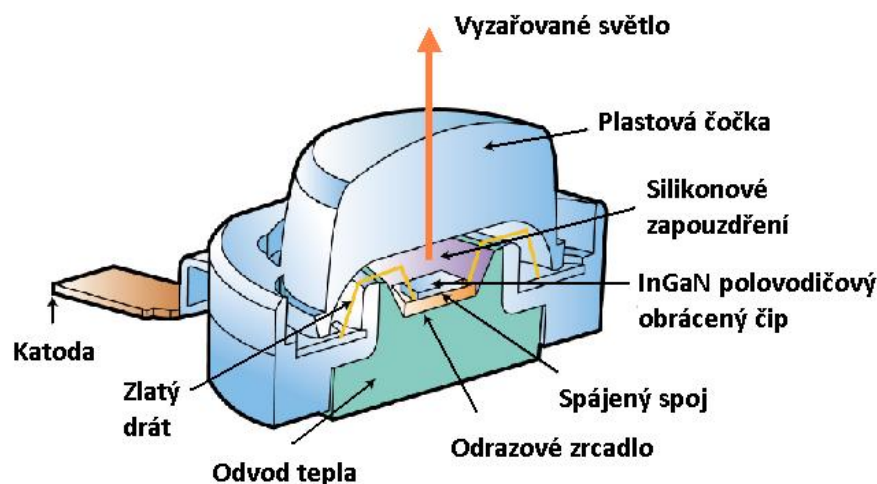
Tyto proudy dosahují hodnot až přes 1A. Obyčejně se vyrábějí s příkonem 1 – 5 W, popřípadě 10 W. Jsou však k dispozici i výkonové LED s příkonem 100 W.



Obr. 11: Ukázka výkonové LED bez chladiče (vlevo) a s chladičem (vpravo)

### 3.7.1 Konstrukce

Aktivní část výkonových LED je tvořena nanometrickými heterostrukturami (tvořícími tzv. supermřížku) ze sloučenin InGaN. Jako základní substrát polovodičového čipu je při výrobě nejčastěji využíván safir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), SiC nebo Si. Pro větší proudy musí být LED opatřeny chladičem pro odvod tepla. Na obrázku 12 lze vidět všechny části výkonové LED.



Obr.12: Konstrukce výkonové LED

### 3.7.2 Bílé LED

Bílé LED je možné vytvořit několika způsoby:

- Modrá LED je opatřena žlutým luminoforem a smícháním modré barvy a luminiscence žlutého luminoforu se vytvoří studené bílé světlo s teplotou chromatičnosti 5 500 K. Modrá barva je dosažena strukturou InGaN. Struktura je pokryta fosforem. Částice fosforu jsou v blízkosti PN přechodu upevněny v zálivce z epoxidové pryskyřice. Množstvím fosforu se dají měnit vlastnosti a intenzita bílého světla.
- Blízká ultrafialová LED je opatřena RGB luminoforem. Smícháním barev se vytvoří teplé bílé světlo s teplotou chromatičnosti 3 300 K.
- Bílé světlo je složeno smícháním tří světél barvy červené, zelené a modré pomocí RGB diody, která umožní vytvoření bílého světla v širokém rozsahu teplot chromatičnosti.

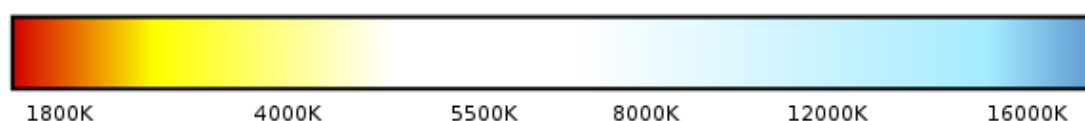
### 3.7.3 Světelná účinnost

Světelný tok vyzářený v lumenech na jednotku příkonu se nazývá světelná účinnost. Výkonové LED dosahují hodnoty až 100 lm/W. K porovnání 60 W žárovka má světelnou účinnost 15

lm/W a žárovka 60 lm/W. Vysokovýkonové LED s příkonem 100 W dosahují světelné účinnosti 70 lm/W a tak dokážou vyžářit světlo o hodnotě až 7000 lm.

### 3.7.4 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti (nebo také barevná teplota) charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané černým tělesem, zahřátým na tuto teplotu v Kelvinech (obrázek 13). Různou teplotou chromatičnosti se dá navodit dojem teplého, neutrálního nebo chladného dojmů prostředí. Teplota chromatičnosti LED může být různá v rozsahu od 3 000 K (teplé světlo) až po 9 000 K (studené světlo).



Obr. 13: Stupnice teploty chromatičnosti

### 3.7.5 Účinnost

Účinností světelných zdrojů se myslí množství elektrické energie přeměněné na světlo v procentech. 100 W žárovka má účinnost asi 5 %. Prakticky dosažitelná účinnost moderních výkonových LED se pohybuje okolo 30 - 50 %. Zbylá část energie, která není vyžářena ve formě fotonů, je přeměněna na teplo. Celková účinnost svítivé diody je nepřímo úměrná teplotě polovodičového čipu svítivé diody.

### 3.7.6 Teplotní závislost

Vlnová délka emitovaného monochromatického záření z čipu svítivé diody se mění v závislosti na teplotě čipu. S narůstající teplotou čipu LED dochází ke snížení energie zakázaného pásu přechodu LED, a tak je z čipu svítivé diody emitováno monochromatické záření o delších vlnových délkách. Se snižující se teplotou čipu LED dochází k jevu opačnému. Při praktickém použití svítivých diod je však změna vlnové délky monochromatického záření vycházejícího z čipu svítivé diody naprosto zanedbatelná. Obzvláště pak u bílých výkonových LED, kdy je část fotonů vycházejících z čipu svítivé diody pomocí luminoforu převedena na světlo žluté barvy, a tak u bílých výkonových LED vlastně dochází pouze ke změně teploty chromatičnosti. Se změnou teploty čipu dochází i k posunu prahového napětí svítivé diody, to je způsobeno zejména změnou energie zakázaného pásu polovodičového přechodu LED. A proto je výhodné tyto optoelektronické prvky budit zejména z napájecího zdroje konstantního proudu.

### **3.7.7 Vyzařovací úhel**

Vyzařovací úhel LED charakterizuje rozložení vyzářeného výkonu od optické osy diody. Vyzařovací úhel výkonové LED může být v rozsahu 15 - 180°. Ovlivnit jej lze velikostí a polohou čipu, rozměry odrazového zrcátka nebo čočky.

### **3.7.8 Životnost**

LED se na rozdíl od žárovky nezničí okamžitě, ale světlo po nějakém čase začne postupně degradovat. Užitečný provozuschopný čas je extrémně dlouhý. Záleží na teplotách a procházejícím proudu diodou, čím jsou tyto dvě hodnoty vyšší, tím se zkracuje doba životnosti LED. 70 % pokles intenzity světla je prahovým momentem, kdy oko rozpozná rozdíl v poklesu světla. Pokles na tuto hodnotu může nastat při 20 000 až 100 000 hodinách používání podle pracovních hodnot teploty a proudu přechodu LED. Při provozu 10 000 hodin LED stále vyzařují 100 % světelného toku.

### **3.7.9 Věrnost barev**

Jedním z ukazatelů, které podávají informaci o kvalitě světelného záření je tzv. index podání barev CRI. Tento ukazatel vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených uvažovaným světelným zdrojem a barvy těchto předmětů osvětlených referenčním zdrojem světla. V přirozeném denním světle se barvy vnímají nejvěrněji, tomu odpovídá CRI o hodnotě 100. Podání barev se považuje za uspokojivé, je-li hodnota CRI vyšší než 40. Jako světelný zdroj s kvalitním podáním barev lze označit takový zdroj světla, jehož CRI je vyšší než 70. CRI u žárovky je roven hodnotě 100. Bílé výkonové LED, které používají světlo modré barvy a žlutý luminofor je obvykle udáván CRI vyšší než 80.

### **3.7.10 Napájení**

LED jsou polovodičové součástky, tudíž musí být napájeny stejnosměrným proudem v propustném směru. Seoul Semiconductor přední firma ve výrobě LED však vymyslela LED moduly, které lze napájet střídavým napětím. Jedná se princip, kdy jsou zapojeny čipy anti-paralelně a první půlvlnu periody svítí jeden čip a druhý nesvítí a ve druhé polovině periody si čipy funkci vymění. Tenhle způsob řešení však sebou nesl různá úskalí, díky nimž dosahovaly tyto výkonové LED světelné účinnosti maximálně 40lm/W. Firma však na rok 2010 slibuje plnohodnotnou LED se světelnou účinností 100lm/W s napájením přímo z distribuční sítě.

## 4. Laser

Laser je zařízení generující koherentní optické záření. Slovo laser je akronymem pro „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, neboli se jedná o zesilování světla pomocí stimulované emise. Laser je využíván v mnoha různých aplikacích, tam kde je potřeba některá z jeho vlastností, jako je koherence záření, směrovost, monochromaticnost nebo intenzita záření. Aby mohl laser fungovat, musí obsahovat aktivní element a optický rezonátor. Aktivní element je v podstatě zesilovač záření, podle nějž se celý laser následně pojmenovává. Například „dye laser“ neboli barevný laser dostal název podle barevného roztoku, který v něm plní funkci zesilovače. Aktivní element je materiál schopný dosáhnout populační inverze při vybuzení. Foton procházející skrze aktivní element má větší šanci k vyprodukování druhého fotonu (té samé vlnové délky) pomocí stimulované emise dříve, než je pohlcen. Požadavky k vytvoření populační inverze se mění pro různé typy buzení. Rezonátor je nutný pro vytvoření kladné optické vazby. Bez zpětné vazby aktivní element poskytuje optické zesílení, ale vzniklý paprsek nemá potřebnou směrovost. Samotný aktivní element bez zpětné vazby může být využit jako zesilovač světla z nízkovýkonových laserů.

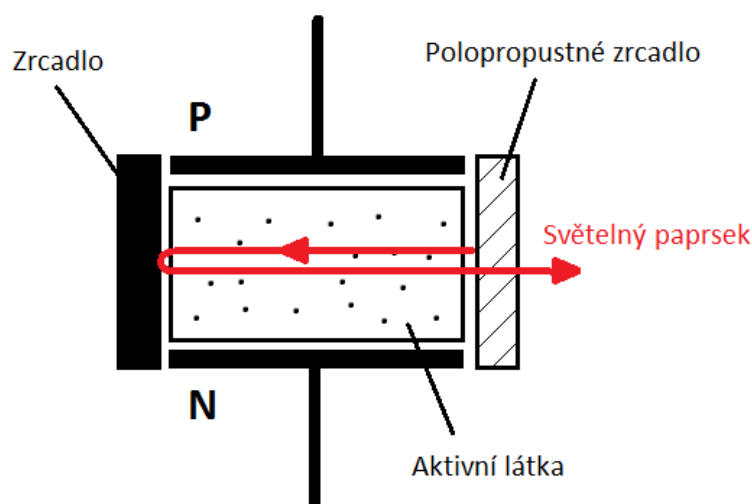
### 4.1 Laser LED

Laser dioda je polovodičová dioda, na jejímž PN přechodu, stejně jako u obyčejné LED, dochází k přeměně elektrické energie na světlo. Do určité hodnoty proudu (tzv. prahový proud) má i stejné světelné vlastnosti jako LED. Překročí-li však laser dioda tuto hodnotu proudu, začne převládat stimulovaná emise nad spontánní, a začne docházet k vyzařování koherentního světla. Podíl stimulované emise na celkové emisi závisí mimo jiné i na intenzitě světla, které emisi stimuluje. Z tohoto důvodu se používají v laserech optické rezonátory (Fabry-Perotův rezonátor). Pro světelné vlny, jejichž vlnové délky odpovídají rezonanční frekvenci rezonátoru, se v rezonátoru vytvoří vlnový stav s relativně vysokou amplitudou. V důsledku toho se prostřednictvím stimulované emise projeví vyzařování vln blízkých rezonančním frekvencím rezonátoru. U polovodičových laserů se jako zrcadla rezonátoru může využít povrch plochy součástky, který však musí být upraven tak, aby měl větší koeficient odrazu.

### 4.2 Rezonátory

Jsou otevřené struktury obsahující dvě nebo více zrcadel uspořádaných tak, aby zajišťovala zpětnou vazbu aktivnímu členu. Nejjednodušším rezonátorem jsou dvě na sebe namířená zrcadla. Tato zrcadla jsou nazývána koncovými. Optické záření se pohybuje mezi zrcadly a prochází skrz aktivní část (obrázek 14). Rezonátory mohou být stabilní nebo nestabilní. Stabilita

je určována poloměrem zakřivení zrcadla, mezerou mezi zrcadly a indexem lomu materiálů, kterými prochází paprsek. Ve stabilním rezonátoru jsou nízké ohybové ztráty a stimulovaná emise není tak vysoká. Tyto rezonátory se používají u laserů s dotovaným světlem z vnějšího zdroje. Nestabilní rezonátor má vysoké ztráty způsobené odrazem a jeho módové délky jsou mnohem větší. Tyto rezonátory se používají u laserů s vysoko aktivními materiály.



Obr. 14: Princip laserové LED

## 5. Driver

Bez ohledu na typ, barvu, rozměry nebo výkon, všechny LED pracují nejlépe, když jsou řízeny konstantním proudem. Výrobci LED uvádějí vlastnosti při určitém protékajícím proudu, nikoli napětí. Integrované obvody určené pro řízení LED se však navrhují jak pro nastavení konstantního výstupního proudu, tak i napětí. V řetězci sériově řazených LED musí být zajištěno, že každá z LED je řízena stejným proudem jako ta druhá. Každá LED je charakterizována i napětím, které je na součástce při daném proudu. K zajištění přesné hodnoty protékajícího proudu v řetězci je nutné, aby byl integrovaný obvod navržen tak, že dodá napětí celému řetězci rovno součtu napětí na každé součástce v obvodu. Proto je výstup těchto IO většinou napětěově regulovatelný s konstantním výstupním proudem.

### 5.1 Když vstupní napětí převyšuje napětí LED

Jestliže napětí převyšuje součet všech maximálních napětí diod, pak jsou na výběr 2 možnosti. Realizace pomocí lineárního regulátoru, nebo spínacího regulátoru (buck regulator). Lineární regulátory představují výkonově a termálně špatné řešení, ale za to jsou jednoduché. Aby mohl

poskytovat konstantní proud, musí být nastavitelný a využívat dvou zpětnovazebních rezistorů. Nahrazením vrchního zpětnovazebního rezistoru řetězcem LED a umístění proudově citlivého rezistoru naspod „přemění“ tento rezistor konstantní zdroj napětí na regulovatelný dokud přes něj neteče dostatek proudu, aby vyrovnal zpětné napětí IO. Lineární regulátory mají výhodu v jednoduchosti, malém počtu součástek a odolnosti vůči elektromagnetickým vlivům. Jsou schopny udržet konstantní proud tak dlouho, dokud hodnota napětí nepřekročí dovolenou mez LED v řetězci. Nevýhodou je, jak bylo řečeno, výkonnost a teplotní ztráty. Při proudech nad 350 mA je nutno použít chlazení, což prodražuje a zvětšuje rozměry návrhu. Efektivnější možnosti, když vstupní napětí přesahuje napětí na LED je snižovací (step-down) neboli spínací regulátor. Stejně jako lineární regulátor, i tento musí být nastavitelný a mohou být použity stejné metody k nastavení spínacích regulátorů jako konstantních proudových zdrojů pro LED. Spínací regulátory mají vysokou účinnost a není třeba je chladit, ale jsou složitější a náchylné na šum. Mnoho moderních spínacích regulátorů s přepínací frekvencí 1 MHz a výš jsou vyráběny z tak malých součástek, že mohou být v některých případech ještě menší, než lineární regulátory.

## **5.2 Když je vstupní napětí menší než napětí LED**

Jestliže je otevírací napětí všech LED v řetězci větší, než vstupní napětí je zapotřebí zvyšovacího (step-up) neboli zesilovacího (boost) regulátoru. Tyto regulátory obsahují zesilovací měniče, které zesilují vstupní napětí. Indukční zesilovací měnič je nejjednodušší regulátor s hodnotami převyšujícími 350 mA a regulovatelným napětím. Stejně jako lineární a spínací regulátory můžeme realizovat zesilovací měnič se zpětnovazebním děličem pro získání zdroje konstantního proudu.

## **5.3 Konstrukce LED driveru**

Aby bylo možno napájet LED driverem, je nutné na jeho vstupní svorky přivést stejnosměrné napětí. Proto je nutné při napájení driveru ze sítě nejdříve toto síťové napětí transformovat transformátorem na nižší napětí, následně jej usměrnit a vyhladit. Transformace napětí musí být na takovou hodnotu napětí, kterou udává výrobce integrovaného obvodu driveru. Já vybral buck driver LM3404, na jehož vstup je nutno přivést napětí 6 – 42 V a výstupní hodnota proudu je až 1,2 mA. Čímž vyhovuje pro návrh driveru, jehož výstupní napětí je 7 V a výstupní proud je regulovatelný v rozmezí 20 – 700 mA.



### 5.3.1 Vstupní napětí driveru

Běžným 12 W transformátorem 12V/1A je vstupní síťové napětí 230 V převedeno na výstupní napětí transformátoru  $U_{2ef} = 12\text{ V}$ . Pro usměrňovač, který je zvolen můstkový, je nutné znát maximální hodnoty napětí a proudu, které budou procházet diodami ze kterých je tvořen. Podle této hodnoty napětí  $U_r = 17\text{ V}$  a proudu  $I_{fmax} = 2,22\text{ A}$  jsou vybrány diody pro usměrňovač 1N5400. Výstupní usměrněné napětí je vypočteno  $U_d = 10,8\text{ V}$  a výstupní proud  $I_d = 1,414\text{ A}$  (obrázek 15). Tyto hodnoty by nebyly stálé, je ještě nutno vypočítat vyhlazovací kondenzátor  $C_V = 1\,755\text{ }\mu\text{F}$  a pro tuto hodnotu najít nejbližší kondenzátor z řady, ve kterých se kondenzátory vyrábí. Pro což vyhovuje kondenzátor E1800M/16VIMT 1800 $\mu\text{F}$ /16V.

$$U_{dmax} = \sqrt{2} \cdot U_{2ef} = \sqrt{2} \cdot 12\text{ V} = 17\text{ V} \quad (1)$$

$$U_r = U_{dmax} = 17\text{ V} \quad (2)$$

$$U_d = 0,9 \cdot U_{2ef} = 0,9 \cdot 12\text{ V} = 10,8\text{ V} \quad (3)$$

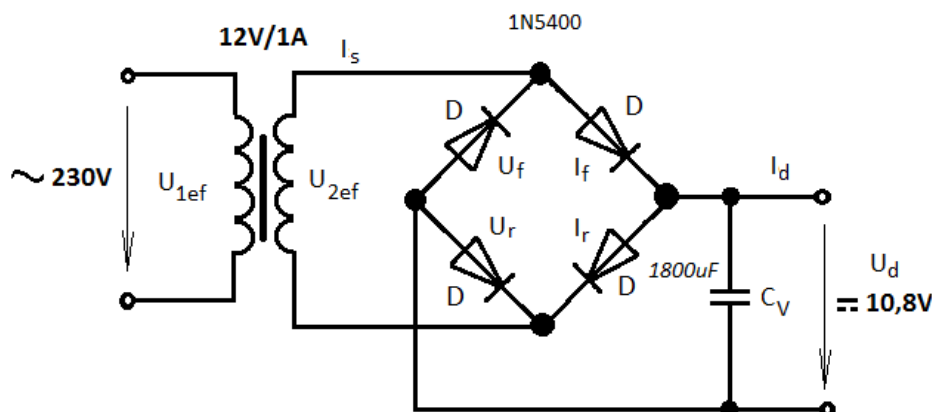
$$I_d = \sqrt{2} \cdot I_s = \sqrt{2} \cdot 1\text{ A} = 1,414\text{ A} \quad (4)$$

$$I_{fmax} = 1,57 \cdot I_d = 1,57 \cdot 1,414\text{ A} = 2,22\text{ A} \quad (5)$$

$$C_V = k \cdot \frac{I_d}{U_{br}} = 6,7 \cdot \frac{1,414\text{ A}}{5,4\text{ V}} = 1755\text{ }\mu\text{F} \quad (6)$$

, kde  $k$  je koeficient zvlnění. Zvlnění pro toto zapojení je 50 % a pro tuto hodnotu je  $k = 6,7$ .

$$U_{br} = 50\% U_d = 0,5 \cdot 10,8\text{ V} = 5,4\text{ V} \quad (7)$$



Obr.15: Výsledné zapojení usměrňovače pro LED driver

### 5.3.2 Nastavení driveru

Jako driver LED jsem vybral integrovaný obvod LM3404 pro jeho vhodné vlastnosti pro zadání. Na výstupu driveru má být napětí 7V a výstupní proud, který protéká přes LED, musí být regulovatelný v rozsahu 20 - 700 mA. Tento obvod je snižovací (buck) s vnitřním MOSFET přepínačem. Rozsah vstupního napětí je 6 - 42 V a výstupní proud může být až 1 A, tudíž je pro zadání ideální. Pro nastavení driveru na požadované hodnoty je nutné vybrat a zapojit součástky podle obrázku. Kde hodnoty kondenzátorů  $C_B$  a  $C_F$  jsou dány výrobcem a jejich hodnoty jsou  $C_B = 10 \text{ nF}$ , který lze použít například CK 10N X7R a  $C_F = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$  CK 100N X7R. Ostatní hodnoty se musí dopočítat ze známých hodnot vstupního napětí a požadovaných výstupních hodnot napětí a proudu pomocí vzorců udaných v katalogu výrobce. Pro řízení proudu protékajícího přes LED je využito zpětné vazby. Hodnota napětí  $V_{SNS}$  je vytvářena jak proud LED prochází rezistorem  $R_{SNS}$ . Napětí  $V_{SNS}$  působí zpětně na pin CS, kde je porovnáváno s referenční hodnotou  $V_{REF} = 200 \text{ mV}$ . Komparátor zapne MOSFET jakmile  $V_{SNS}$  klesne pod hodnotu  $V_{REF}$ . MOSFET je zapnut po dobu  $t_{ON}$ , která je nastavena rezistorem  $R_{ON}$  a musí být minimálně 300 ns. Po uplynutí doby  $t_{ON}$  se MOSFET vypne na dobu  $t_{OFF}$ , která musí být také minimálně 300 ns. Jakmile skončí doba  $t_{OFF}$  začíná znovu porovnání hodnoty  $V_{SNS}$  s referenční hodnotou  $V_{REF}$ . Hodnoty  $t_{ON}$  a  $t_{OFF}$  musí být zajištěny i pro případ, že vstupní napětí bude klesat nebo narůstat v rozsahu  $\pm 20 \%$ . Potom se vypočítá čas  $t_{ON}$  pro hodnotu vstupního napětí větší o 20 % pro zvolenou hodnotu rezistoru  $R_{ON}$ .

$$t_{ON} = k \cdot \frac{R_{ON}}{V_{IN}} = 1,34 \cdot 10^{-10} \frac{220000 \Omega}{13V} = 2 \, 268 \text{ ns} \quad (8)$$

A zkontroluje se, jestli vyhovuje podmínce  $t_{OFF}$ .

$$t_{OFF} = t_{ON} \cdot \left( \frac{V_{IN} \cdot \eta}{V_{OUT}} - 1 \right) = 2268 \cdot 10^{-9} \left( \frac{13V \cdot 0,9}{7V} - 1 \right) = 1\,522\,ns \quad (9)$$

Kde  $\eta$  je účinnost integrovaného obvodu. Pro obvod LM3404 se udává  $\eta = 90\%$ .

Nyní se za  $V_{IN}$  dosadí hodnota o 20 % menší a vypočítá se znovu  $t_{ON}$ .

$$t_{ON} = k \cdot \frac{R_{ON}}{V_{IN}} = 1,34 \cdot 10^{-10} \frac{220000\Omega}{8,6V} = 3\,428\,ns \quad (10)$$

A zkontroluje se, jestli vyhovuje podmínce  $t_{OFF}$ .

$$t_{OFF} = t_{ON} \cdot \left( \frac{V_{IN} \cdot \eta}{V_{OUT}} - 1 \right) = 3428 \cdot 10^{-9} \left( \frac{8,6V \cdot 0,9}{7V} - 1 \right) = 363\,ns \quad (11)$$

Podmínky jsou splněny, tudíž výsledný odpor můžeme zvolit 220 k $\Omega$ . Pro další výpočty je nutné vypočítat střidu  $D$  tohoto průběhu, kde hodnoty  $t_{ON}$  a  $t_{OFF}$  jsou brány pro  $V_{IN} = 10,8\,V$ .

$$t_{ON} = k \cdot \frac{R_{ON}}{V_{IN}} = 1,34 \cdot 10^{-10} \frac{220000\Omega}{10,8V} = 2\,730\,ns \quad (12)$$

$$t_{OFF} = t_{ON} \cdot \left( \frac{V_{IN} \cdot \eta}{V_{OUT}} - 1 \right) = 3428 \cdot 10^{-9} \left( \frac{10,8V \cdot 0,9}{7V} - 1 \right) = 1\,060\,ns \quad (13)$$

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{2730 \cdot 10^{-9}s}{2730 \cdot 10^{-9}s + 1060 \cdot 10^{-9}s} = 0,72 \quad (14)$$

Tahle hodnota je důležitá pro volbu schottkyho diody D1, která udržuje proud cívky po dobu kdy je MOSFET vypnut. Proud procházející diodou je dán vztahem

$$I_{D1} = (1 - D) \cdot I_f = (1 - 0,72) \cdot 0,7A = 196 \text{ mA} \quad (15)$$

Schottkyho dioda musí být dále schopna vydržet hodnoty vstupního napětí a jakéhokoli zvlnění (ringing) po čas, kdy je MOSFET zapnut. Tomuto vyhovuje například Schottkyho dioda 20V 1A DO41.

Dále je nutný výpočet výstupní cívky, která slouží jako filtr výstupního proudu. K tomu je nutné znát procentuální zvlnění driveru  $\Delta i_{Fp,p}$ , které je typicky 40 %.

$$\Delta i_F = \Delta i_{Fp,p} \cdot I_F = 0,4A \cdot 0,7A = 0,28 A \quad (16)$$

$$L_{MIN} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{\Delta i_F} \cdot t_{ON} = \frac{10,8V - 7V}{0,28A} \cdot 2730 \cdot 10^{-9}s = 37 \mu H \quad (17)$$

L lze vybrat z řady například 47 $\mu$ H 1A DPU047A1.

Vstupní kondenzátor dodává pulzy proudu přibližně rovny  $I_F$ , zatímco je MOSFET zapnut a po dobu vypnutí MOSFET se nabíjí vstupním napětím. Pro volbu vstupního kondenzátoru je nutné znát hodnotu změny napětí na  $C_{IN}$  po čas stavu zapnutí. Při návrhu se tato hodnota volí  $\Delta V_{IN(MAX)} = 10 \% V_{IN}$ .

$$C_{IN(MIN)} = \frac{I_f \cdot t_{ON}}{\Delta V_{IN(MAX)}} = \frac{0,7A \cdot 2730 \cdot 10^{-9}s}{1,08V} = 518 \text{ nF} \quad (18)$$

Výsledný kondenzátor  $C_{IN}$  se volí 2 krát větší než vypočítaný  $C_{IN(MIN)}$ .

$$C_{IN} = 2 \cdot C_{IN(MIN)} = 2 \cdot 518 \text{ nF} = 1036 \text{ nF} \quad (19)$$

Kondenzátor je vybrán z řady například MKT R82 1 $\mu$ F.

Výstupní proud  $I_F$  má být regulovatelný v rozsahu 20 - 700 mA. Velikost výstupního proudu závisí na hodnotě rezistoru  $R_{SNS}$ , který je dán vztahem

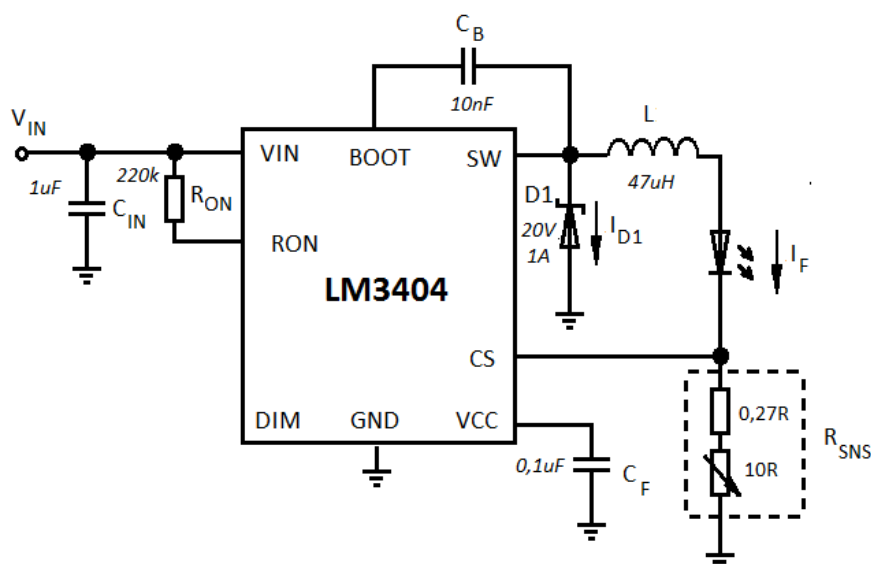
$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS}}{I_F} \quad (20)$$

Kde  $V_{SNS}$  je výstupní napětí pinu CS a jeho hodnota je stálá 200 mV. Dosazením hraničních hodnot proudu do vzorce se získají hodnoty rezistorů, mezi kterými bude proud nabývat žádaných hodnot.

$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS}}{I_{F(MIN)}} = \frac{0,2V}{0,02A} = 10 \Omega \quad (21)$$

$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS}}{I_{F(MAX)}} = \frac{0,2V}{0,7A} = 0,28 \Omega \quad (22)$$

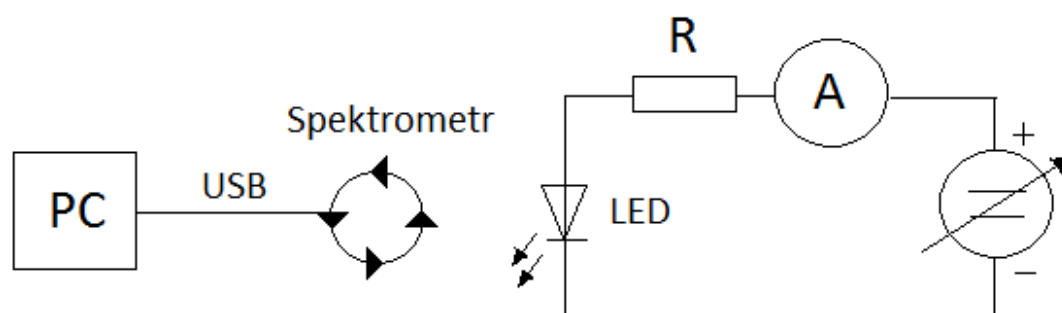
$R_{SNS}$  je tedy složen z rezistoru  $0,27 \Omega$  a k němu sériově řazeného potenciometru  $10 \Omega$ . Výsledné zapojení potom vypadá, jak je uvedeno na obrázku 16.



Obr.16: Výsledné zapojení LED driveru

## 6. Realizace pracoviště pro praktické měření

Měřicí pracoviště se skládalo z obvodu pro řízení protékajícího proudu diodou. Kde do obvodu napájeného ze stejnosměrného regulovatelného zdroje byl společně s LED zapojen předřadný odpor, aby nedošlo ke zničení diody a ampérmetr pro sledování hodnoty protékajícího proudu. LED byla pevně uchycena ve svorkovnici k zafixování její polohy a před ní se umístil optický kabel, jehož jeden konec byl uchycen držákem a namířen na LED a druhý byl zapojený do spektrometru, který analyzoval spektrum jejího záření a ve formě dat posílal tyto informace přes USB do počítače (obrázek 17), kde pomocí programu SpectraSuite bylo schopno vidět spektrální charakteristiku LED.



Obr.17: Schematické zapojení pracoviště

### 6.1 Spektrometr USB650

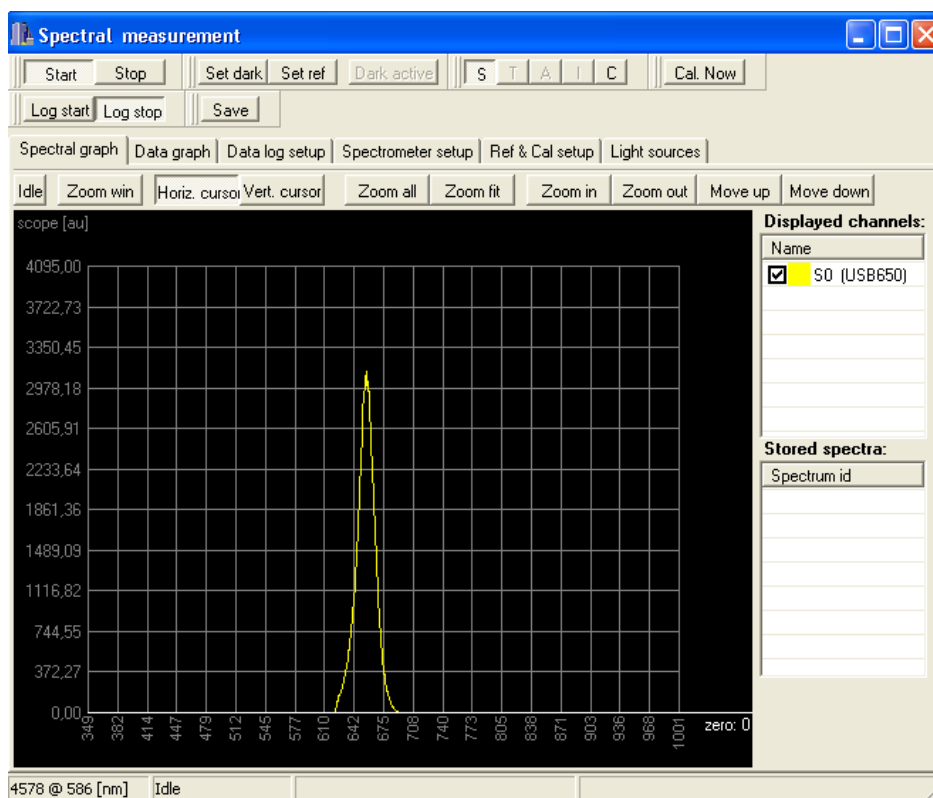
USB650 spektrometr (obrázek 18) je přednastavený, volně dostupný spektrometr s rozsahem vlnových délek 350 - 1 000 nm. Připojuje se k PC pomocí USB portu a nepotřebuje vnější zdroj napájení.



Obr.18: Spektrometr USB650

## 6.2 SpectraSuite

SpectraSuite (obrázek 19) je operační na Javě založený software poslední generace všech Ocean Optics spektrometrů, který je schopen pracovat na operačním systému Windows, Macintosh nebo Linux. SpectraSuite je uživatelsky upravitelný, vyvíjející se zobrazovací program, který poskytuje real-time uživatelské rozhraní pro zobrazení různých druhů funkcí zpracovávaných signálů. Se SpectraSuite je možnost vykonávat spektroskopické měření (jako například absorpce, reflexe a vyzařování), kontrolovat všechny parametry systému, shromažďovat a zobrazovat data v reálném čase a provádět monitoring těchto měření při různém stupni integrace času.



Obr.19: Program SpectraSuite

## 6.3 Přehled vzorkovacího systému spektrometru

Ocean Optics systém optických spektrometrů je složen z levných, standardních komponentů pro získání dat. Typický vzorkovací systém USB650 je založen na 4 základních elementech:

- USB650 Spektrometr

- operační software SpectraSuite
- Zdroj záření
- Vzorkovací optické zařízení (proměnlivé, záleží na aplikačních požadavcích)

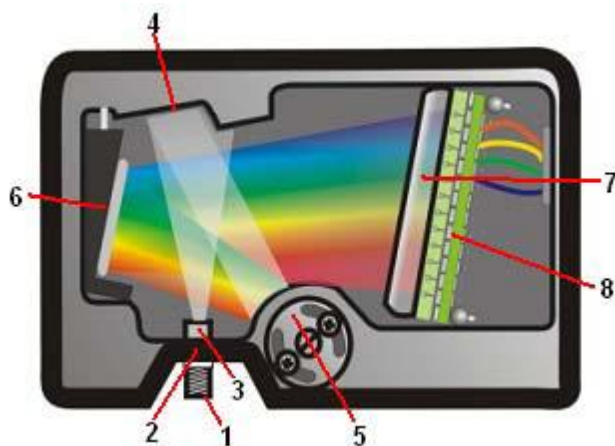
## 6.4 Princip vzorkování spektrometru

Následující seznam vysvětluje funkci komponent vzorkovacího zařízení Ocean Optics při vzorkování:

1. Uživatel udržuje neměnnou, dobře zajištěnou pracovní plochu pro správnou odezvu příslušných vyhodnocovaných proměnných.
2. Světlo (vzorek) ze světelného zdroje je vysíláno skrze optické vlákno do spektrometru.
3. Spektrometr měří množství světla a mění data nashromážděná spektrometrem do digitální podoby.
4. Spektrometr posílá informace o vzorku aplikaci SpectraSuite.
5. SpectraSuite zobrazí zpracované spektrální informace.

## 6.5 Princip činnosti spektrometru

Následující obrázek (obrázek 20) ilustruje pohyb světla skrz spektrometr.



Obr.20: Vnitřní zapojení spektrometru

Následující seznam popisuje jednotlivé části obrázku spektrometru:

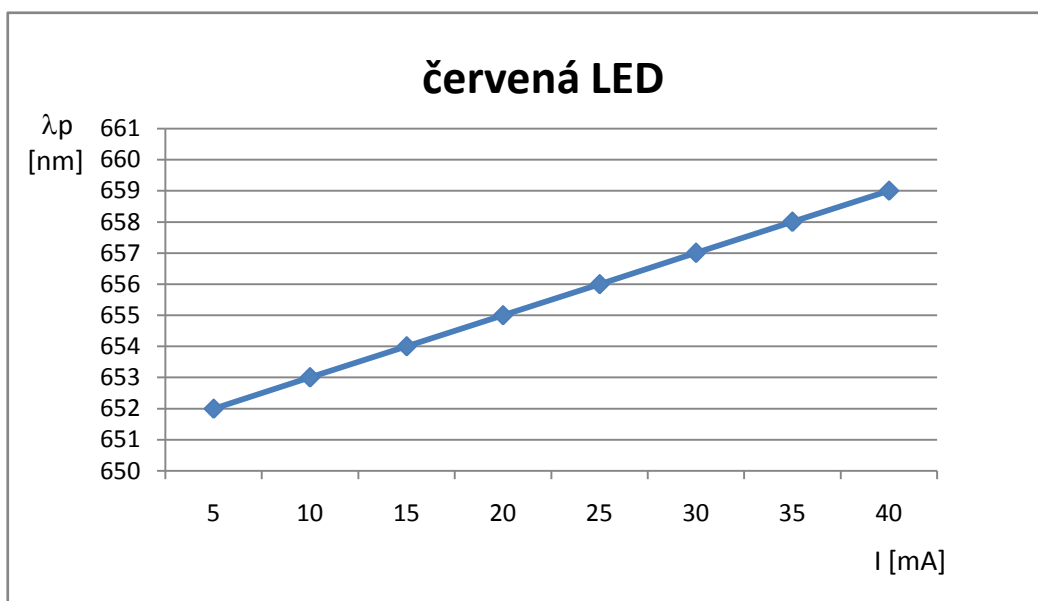
1. SMA konektor – zajišťuje vstup vlákna do spektrometru. Světlo z vlákna vstupuje do spektrometru.



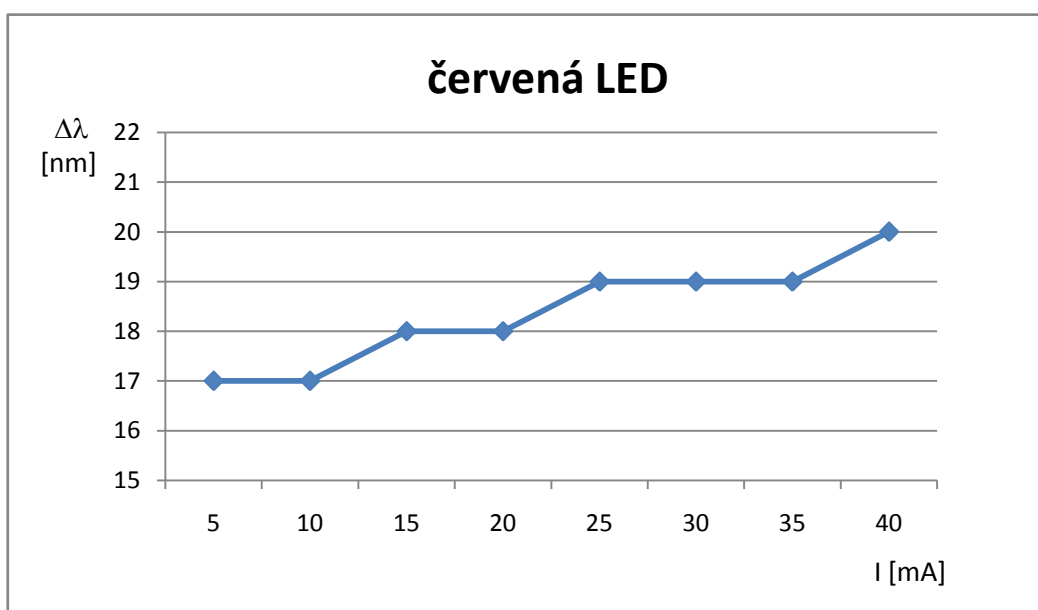
2. Štěrbina – je kus tmavého materiálu obsahující pravoúhlý vstup, který se montuje přímo za SMA konektor. Velikost otvoru reguluje množství průchozího světla do spektrometru a řídí spektrální rozklad.
3. Filtr – je zařízení, které omezuje optické záření na předurčenou oblast vlnových délek. Světlo prochází filtrem před vstupem do samotného spektrometru. K vymezení záření v požadované oblasti vlnových délek se dá využít jak pásmové, tak i délkové propusti.
4. Kolimační zrcadlo – zaostřuje světlo vstupující do jádra spektrometru směrem k mřížce. Světlo vstupuje do spektrometru skrz SMA konektor, štěrbinu a filtr a potom se odráží od kolimačního zrcadla na mřížku.
5. Mřížka – ohýbá světlo z kolimačního zrcadla a směruje ho na zaostřovací zrcadlo. Mřížky jsou dostupné v různých hustotách drážkování umožňující vymezení pokrytí vlnových délek a jejich rozložení.
6. Zaostřovací zrcadlo – přijímá odražené světlo z mřížky a zaostřuje světlo na CCS detektor nebo na L2 detekční sběrací čočku (záleží na konfiguraci spektrometru).
7. L2 detekční sběrací čočka – je připevněná k CCD detektoru. Zaostřuje světlo ze štěrbin na elementy CCD detektoru. Štěrbiny detektoru by měly být velkého průměru, nebo by měl být používán při nízkých hladinách světla. Také zvyšuje efektivitu snížením vlivu odraženého světla.
8. CCD detektor (UV nebo viditelné spektrum) – zachytává světlo přijímané ze zaostřovacího zrcadla nebo z L2 detekční sběrací čočky a převádí optický signál na digitální. Každý pixel na CCD detektoru reaguje na vlnovou délku světla, která na něj dopadá a vytváří digitální odezvu. Spektrometr tuto odezvu dále posílá aplikaci SpectraSuite.

## 6.6 Postup měření

Měření proudu protékajícího LED v rozsahu od minimálních hodnot přes pracovní hodnotu danou výrobcem až po hodnoty za touto hranicí a pro každou tuto hodnotu zobrazení spektrální charakteristiky. Získání pracovní vlnové délky  $\lambda_p$  a šířky spektrální charakteristiky  $\Delta\lambda$  z těchto charakteristik. Opakování postupu pro všechny zadané LED. Sestrojení grafů v závislosti vlnové délky na procházejícím proudu (obrázek 21) a šířky spektrální charakteristiky na procházejícím proudu (obrázek 22).



Obr.21: Závislost pracovní vlnové délky na procházejícím proudu LED



Obr.22: Závislost šířky spektrální charakteristiky na procházejícím proudu LED

## 7. Závěr

Z naměřených charakteristik lze vidět, že při změně velikosti protékajícího proudu jakoukoli světlo emitující diodou se spektrální charakteristika posouvá po ose vlnové délky a mění i svou tloušťku. Většinou se spektrální charakteristika u zkoumaných LED posouvala směrem doprava po ose vlnové délky, v jednom případě však byl posun opačný, a to u modře svítící LED

5B4HCA-H. Spektrální charakteristiky, se u většiny LED rozšiřovaly při narůstajícím proudu, v jednom případě se však zužovala a to u žlutě svítící LED B5B-433-014. Každá barva LED je vytvořena jiným složením materiálů PN přechodu a jeho tloušťkou. Tudíž oba tyto faktory mají vliv na směr posunu a změnu šířky spektrální charakteristiky. Lze vidět, že od hodnot proudu, které stačí ke slabému rozsvícení LED přes doporučenou hodnotu, až po hodnoty, které se blíží k maximálnímu únosným, byla změna vlnové délky v maximálním případě o 7 nm a šířka se maximálně změnila o 6 nm. Z grafů lze vidět, že při změně proudu o  $\pm 20$  % kolem pracovní hodnoty proudu stanovené výrobcem (20 mA) se vlnová pracovní délka průměrně nezměnila vůbec nebo jen o 1 nm. Šířka spektrální charakteristiky se průměrně změnila o 1 nm při této změně proudu. Výkonová LED měla průběhy závislosti shodné se závislostmi obyčejných LED. V celém rozsahu hodnot 30 – 250 mA se vlnová pracovní délka změnila o 4 nm směrem doprava a šířka spektrální charakteristiky zvětšila o 4 nm. Vzhledem k tomu, že výkonové LED jsou určeny zejména k osvětlování, tak takové malé změny vlnové délky nemají téměř žádný vliv na subjektivní vnímání změn barev pozorovatele. Všechny LED mají navíc toleranci vyzařované délky v rozmezí okolo  $\pm 5$  nm, ve které se naměřené hodnoty pohybovaly. Vlnová délka laserové LED se v celém měřeném rozsahu hodnot proudu změnila jen o 2 nm. Tolerance vlnové délky laserových zdrojů světla od pracovní vlnové délky bývá udávána  $\pm 20$  nm, takže změna vlnové délky vlivem procházejícího proudu o 2 nm je zanedbatelná. Laserové LED jsou monochromatickými zdroji záření, tudíž jejich šířka spektrální charakteristiky je velmi úzká (kolem 1 nm) a s navyšujícím proudem se mění velmi málo. V mém měření jsem nezaznamenal žádnou změnu šířky spektrální charakteristiky

## Literatura

- [1] *ELEKTROTECHNICKÉ A TELEKOMUNIKAČNÍ INSTALACE* [online]. Praha : Verlag Dashöfer, duben 2008 [cit. 2010-05-03]. ELEKTROLUMINISCENČNÍ DIODY, s. . Dostupné z WWW: <[http://www.dashofer.cz/download/pdf/ele\\_ukazka2.pdf?wa=WWW10IX](http://www.dashofer.cz/download/pdf/ele_ukazka2.pdf?wa=WWW10IX)>.
- [2] *LED In Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 16 October 2001, 3 May 2010 [cit. 2010-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/LED>>.
- [3] *LED In Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 21. 9. 2005, 24. 3. 2010 [cit. 2010-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>>.
- [4] LED žárovky s výkonovými LED - možnost jak ušetřit (nejenom) elektrickou energii. *Zajímavé výrobky* [online]. 1. července 2008, 25, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <[http://www.fktechnics.cz/cz/clanky/zajimave-vyroby/art\\_98/led-zarovky-s-vykonovymi-led-moznost-jak-usetrit-nejenom-elektrickou-energi.aspx](http://www.fktechnics.cz/cz/clanky/zajimave-vyroby/art_98/led-zarovky-s-vykonovymi-led-moznost-jak-usetrit-nejenom-elektrickou-energi.aspx)>.
- [5] Seoul Semiconductor plans a 100-lm/W AC LED light source. *Products* [online]. 01 Feb 2010, 21074, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.ledsmagazine.com/products/21074>>.
- [6] Seoul Semiconductor launches AC LED lighting source Acriche. *INDUSTRY NEWS* [online]. 17 Nov 2006, 3/11/14, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.ledsmagazine.com/news/3/11/14>>.
- [7] Understanding power LED lifetime analysis. *Technology White Paper* [online]. 2009, 12, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.philipslumileds.com/pdfs/WP12.pdf>>.
- [8] JOSÉ, Silva. *Abcdimenze.wz.cz* [online]. 2007 [cit. 2010-05-04]. ABCDimenze. Dostupné z WWW: <<http://abcdimenze.wz.cz/elektronika/usmernovace.html>>.
- [9] MELČ, Antonín. Světelné zdroje pro interiéry aneb jak nahradit klasickou žárovku. *Světlo* [online]. 2009, 38557, [cit. 2010-05-04]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38557](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38557)>.
- [10] REYNOLDS, Matthew. LM3402/LM3404 Fast Dimming and True Constant LED Current Evaluation Board. *Application note* [online]. December 10, 2008, 1839, [cit. 2010-05-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.national.com/an/AN/AN-1839.pdf>>.

- [11] RICHARDSON, Chris. LM3404/LM3404HV Evaluation Board. *Aplication note* [online]. August 14, 2009, 1545, [cit. 2010-05-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.national.com/an/AN/AN-1545.pdf>>.
- [12] SALEH, Bahaa E. A. ; TEIHH, Malvin Carl . *Základy fotoniky : svazek 2*. Praha : MATFYZPRESS, 1991. 208 s.
- [13] SALEH, Bahaa E. A.; TEIHH, Malvin Carl. *Základy fotoniky : svazek 3*. Praha : MATFYZPRESS, 1991. 340 s.
- [14] ŠTÁL, Petr. Otázky a odpovědi od odborníka na problematiku osvětlování. *Zeptejte se experta* [online]. 2010, 1, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <[http://mobigem.cz/lighting/cs/proc\\_led/Zeptejte\\_se\\_experta\\_1.pdf](http://mobigem.cz/lighting/cs/proc_led/Zeptejte_se_experta_1.pdf)>.
- [15] ŠTÁL, Petr. Otázky a odpovědi od odborníka na problematiku osvětlování. *Zeptejte se experta* [online]. 2010, 2, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <[http://mobigem.cz/lighting/cs/proc\\_led/Zeptejte\\_se\\_experta\\_2.pdf](http://mobigem.cz/lighting/cs/proc_led/Zeptejte_se_experta_2.pdf)>.
- [16] ŠTÁL, Petr. Otázky a odpovědi od odborníka na problematiku osvětlování. *Zeptejte se experta* [online]. 2010, 3, [cit. 2010-05-03]. Dostupný z WWW: <[http://mobigem.cz/lighting/cs/proc\\_led/Zeptejte\\_se\\_experta\\_3.pdf](http://mobigem.cz/lighting/cs/proc_led/Zeptejte_se_experta_3.pdf)>.
- [17] ŠTÁL, Petr. *Problematika přímé náhrady návěstních žárovek „výkonovými“ svítivými diodami*. Plzeň, 2008. 28 s. článek. Západočeská univerzita.

## Seznam příloh

- Příloha 1: Závislost vlnové pracovní délky na proudu modře svítící LED 5B4HCA-H
- Příloha 2: Závislost vlnové pracovní délky na proudu žlutě svítící LED B5B-433-014
- Příloha 3: Závislost vlnové pracovní délky na proudu žlutě svítící LED B5B-434-TY
- Příloha 4: Závislost vlnové pracovní délky na proudu oranžově svítící LED B5B-435-305
- Příloha 5: Závislost vlnové pracovní délky na proudu červeně svítící LED 5R3BCA-H
- Příloha 6: Závislost vlnové pracovní délky na proudu červeně svítící LED RLS-655-3-25
- Příloha 7: Závislost vlnové pracovní délky na proudu infračerveně svítící LED LED740-01AU
- Příloha 8: Závislost vlnové pracovní délky na proudu výkonové LED LXHL-LB5C
- Příloha 9: Závislost vlnové pracovní délky na proudu laserové LED PM67-D1P0U
- Příloha 10: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu modře svítící 5B4HCA-H
- Příloha 11: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu žlutě svítící B5B-433-014
- Příloha 12: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu žlutě svítící B5B-434-TY
- Příloha 13: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu oranžově svítící B5B-435-305
- Příloha 14: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu červeně svítící 5R3BCA-H
- Příloha 15: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu červeně svítící RLS-655-3-25
- Příloha 16: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu infračerveně svítící LED740-01AU
- Příloha 17: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu výkonové LED LXHL-LB5C
- Příloha 18: Závislost šířky spektrální charakteristiky na proudu laserové LED PM67-D1P0U
- Příloha 19: Tabulky všech měřených diod
- Příloha 20: Datasheet pro driver LM3404